

**Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje**

**UTJECAJ SILA OPTEREĆIVANJA NA
VRIJEDNOST IZMJERENE TVRDOĆE
KOD METODE VICKERS**

Završni rad

Igor Kamerla

Zagreb, 2008.

**Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje**

**UTJECAJ SILA OPTEREĆIVANJA NA
VRIJEDNOST IZMJERENE TVRDOĆE
KOD METODE VICKERS**

Završni rad

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Mladen Franz

Igor Kamerla

Zagreb, 2008.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni projekt izradio samostalno uz stručnu pomoć dr. sc.
Željka Alara i Tamare Aleksandrov dipl. ing.

Student:

Igor Kamerla

SADRŽAJ

Sažetak.....	1
Popis slika.....	2
Popis tablica.....	3
Popis oznaka.....	4
1. Uvod.....	5
1.1 Povijesni razvoj mjerenja tvrdoće.....	6
1.2 Slijedivost mjerenja tvrdoće.....	7
2. Brinell metoda.....	9
3. Rockwell metoda	11
4. Vickers metoda.....	12
4.1 Oprema za mjerenje tvrdoće metodom Vickers.....	15
4.2 Faktori koji mogu utjecati na vrijednosti tvrdoća.....	16
4.2.1 Pogreške uređaja za mjerenje.....	16
4.2.2 Utjecaj okoline.....	18
4.2.3 Utjecaj indentora (penetratora).....	19
4.2.4 Utjecaj ispitnog uzorka.....	19
5. Umjeravanje opreme za mjerenje tvrdoće.....	21
5.1 Postupak umjeravanja tvrdomjera.....	22
5.1.1 Direktna metoda umjeravanja.....	22
5.1.1.1 Provjera sila opterećivanja.....	22

5.1.1.2 Provjera dijamantnog indentora.....	23
5.1.1.3 Provjera sustava za očitavanje veličine otiska.....	24
5.1.1.4 Provjera ispitnog ciklusa.....	24
5.1.2 Indirektna metoda umjeravanja.....	25
6. Eksperimentalni dio.....	26
6.1 Uvod.....	26
6.2 Plan eksperimenta.....	26
6.3 Osnovni podaci o tvrdomjerima.....	28
6.4 Rezultati mjerenja.....	33
7. Analiza rezultata.....	42
8. Zaključak.....	48
Literatura.....	49

SAŽETAK

U ovom završnom projektu teoretski i eksperimentalno obrađen je utjecaj sila opterećivanja na vrijednosti izmjerene tvrdoće kod metode Vickers.

U prvom dijelu rada dan je pregled i kratak opis osnovnih metoda mjerenja tvrdoće Brinell, Rockwell i Vickers te prednosti i nedostaci svake od metoda.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je umjeravanje sile tvrdomjera Zwick i Indentec te mjerenje tvrdoće na referentnim pločicama različitih tvrdoća. U radu je opisano sljedeće:

- Postupak provjere sila opterećivanja
- Provjera sila opterećivanja na etalonskom i ispitnom tvrdomjeru za mjerna područja HV 1; HV 5; HV 10.
- Analiza rezultata i zaključak.

Sva navedena ispitivanja smo prvo vršili na ispitnom tvrdomjeru Zwick, a zatim na etalonskom tvrdomjeru Indentec. Mjerenje je vršeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

POPIS SLIKA

- Slika 1. Grafički prikaz izbora kuta 136°
- Slika 2. Prikaz greške kod indentora
- Slika 3. Prikaz najtvrdih ploha
- Slika 4. Tvrdomjer 1
- Slika 5. Tvrdomjer 2
- Slika 6. Prikaz mjernih linija
- Slika 7. Display tvrdomjera 2
- Slika 8. Odstupanja od kvadratičnosti dijamantne piramide
- Slika 9. Vrh dijamantne piramide
- Slika 10. Piramida sljedivosti umjeravanja
- Slika 11. Dinamometri
- Slika 12. Mjerno pojačalo
- Slika 13. Izgled referentne pločice
- Slika 14. Grafički prikaz rezultata mjerenja referentne pločice 1 na tvrdomjeru 1
- Slika 15. Grafički prikaz rezultata mjerenja referentne pločice 2 na tvrdomjeru 1
- Slika 16. Grafički prikaz rezultata mjerenja referentne pločice 3 na tvrdomjeru 1
- Slika 17. Grafički prikaz rezultata mjerenja referentne pločice 1 na tvrdomjeru 2
- Slika 18. Grafički prikaz rezultata mjerenja referentne pločice 2 na tvrdomjeru 2
- Slika 19. Grafički prikaz rezultata mjerenja referentne pločice 3 na tvrdomjeru 2

POPIS TABLICA

Tablica 1. Publikacije o normama za pojedinu metodu u različitim zemljama

Tablica 2. Skale Vickers tvrdoće

Tablica 3. Brzine opterećenja

Tablica 4. Utjecaj vibracija na tvrdoću

Tablica 5. Osnovne karakteristike tvrdomjera 1

Tablica 6. Osnovne karakteristike tvrdomjera 2

Tablica 7. Zahtjevi za ispitni ciklus

Tablica 8. Osnovni podaci o dinamometrima i mjernom pojačalu

Tablica 9. Rezultati mjerenja sila na tvrdomjeru 1

Tablica 10. Osnovni podaci o etalonskim pločicama

Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 1 na tvrdomjeru 1

Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 1

Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 1

Tablica 14. Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 1 na tvrdomjeru 2

Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 2

Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 2

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
d	mm	Promjer otiska
D	mm	Promjer kuglice
F	N	Sila
F_0	N	Predopterećenje
F_1	N	Glavno opterećenje
h	mm	Debljina uzorka
HB	/	Tvrdoća po Brinellu
HRB	/	Tvrdoća po Rockwellu (ball)
HRC	/	Tvrdoća po Rockwellu (cone)
HV	/	Tvrdoća po Vickersu
m	kg	Masa ekvivalentna kočionim masama aparata koncentrirana na penetratoru
Rm	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
s	mm ²	Površina otiska
v	m/s ²	Brzina otpuštanja indentora

1. UVOD

Tvrdoća po definiciji predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrdog tijela. Također se može reći da je tvrdoća svojstvo materijala da se bez pojave deformacija suprotstavi prodiranju drugog tijela. Tvrdoća se naime može povezati s krutošću ili otpornošću abraziji, rezanju itd.

Prema Mohs-u svi materijali su prema tvrdoći svrstani u 10 razreda. Najtvrdem materijalu – dijamantu pripada tvrdoća 10, dok je najmekši milovka (puder) s tvrdoćom 1.

Za razliku od ostalih fizikalnih veličina kao što su dužina, vrijeme, masa, tvrdoća je relativna veličina pa se ne nalazi u SI sustavu mjernih jedinica. U strojarstvu tvrdoća je povezana s ostalim mjernim jedinicama kao što su čvrstoća, granica razvlačenja, žilavost itd. Da bi se izabrao odgovarajući materijal za dijelove koji su izloženi trošenju, mora se poznavati tvrdoća tog materijala. Iz iskustva je poznato da se tvrdi materijali sporije troše.

Unatoč tome što tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava. Razlog tome je s jedne strane što je tvrdoća u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima (npr. R_m), a s druge strane mjerenje tvrdoće je jednostavno i prije svega brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih svojstava. Nadalje za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je mjerenje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima. Zbog toga su se s vremenom razvile različite metode mjerenja tvrdoće. Za samo ispitivanje ne treba izraditi posebnu epruvetu (ispitni uzorak) nego samo odgovarajuće pripremiti plohe uzorka ili strojnog dijela. Uređaji za mjerenje tvrdoće (tvrdomjeri) u pravilu su jednostavniji i jeftiniji od nekih drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava (na primjer kidalica) [1].

1.1 Povijesni razvoj mjerenja tvrdoće

Mjerenje tvrdoće je relativno star postupak, a prva mjerenja datiraju još iz 17. stoljeća. Tijekom vremena stalno su se razvijale nove metode ili poboljšavale stare metode. U tablici 1 dan je kronološki prikaz nastanka prvih publikacija o normama za pojedinu metodu u različitim zemljama svijeta.

Tablica 1: Publikacije o normama za pojedinu metodu u različitim zemljama [2]

Metoda	Njemačka	Velika Britanija	SAD	Francuska	ISO
Brinell	1942	1937	1924	1946	1981
Rockwell	1942	1940	1932	1946	1986
Vickers	1940	1931	1952	1946	1982
Knoop	-	-	1969	-	1993

Prvu metodu za mjerenje tvrdoće, koja je klasificirala različite materijale u određene razrede tvrdoće, razvio je još početkom devetnaestog stoljeća Friedrich Mohs (1773 – 1839) njemački geolog/mineralog.

1.2 Sljedivost mjerenja tvrdoće

Kao i kod svih drugih mjernih veličina povjerenje u rezultat mjerenja tvrdoće može se postići jedino ostvarivanjem sljedivosti mjerenja sve do primarnog etalona. Stoga umjeravanja i ispitivanja opreme za mjerenje tvrdoće trebaju biti u skladu s nacionalnim mjeriteljskim normama.

Područje skala tvrdoće je zasnovano na tri osnovna elementa:

a) **Definicija skale tvrdoće:** opis mjerne metode, odgovarajuće tolerancije veličina koje su uključene i ograničavajući uvjeti okoline.

b) **Referentni uređaj za mjerenje tvrdoće:** Metrološki uređaji, koji materijaliziraju definiciju skale tvrdoće. Treba razlikovati primarne etalone tvrdoće, koji utvrđuju najbolju moguću realizaciju definicije skale tvrdoće i referentne etalone tvrdoće, koji se koriste pri proizvodnji referentnih pločica tvrdoće.

c) **Referentna pločica tvrdoće:** Može se razlikovati između primarnih etalonskih pločica za tvrdoću - umjeravanih putem primarnih etalona i koje se koriste kada je zahtijevana najveća točnost, npr. za verifikaciju i umjeravanje referentnih etalona tvrdoće i referentnih pločica za tvrdoću - namijenjenih pretežno za verificiranje i umjeravanje industrijskih ispitnih tvrdomjera [2].

Veličina tvrdoće i njena dimenzija za neki materijal ovise o metodi mjerenja.

Tvrdoća se može definirati po makro, mikro ili nano skali s obzirom na primijenjenu silu.

Makro-tvrdoća se ispituje statičkim i dinamičkim metodama na malim uzorcima materijala. Statičke metode imaju prednost jer se lakše ponavljaju, dok se dinamičke metode provode ručno uz pomoć jednostavnijih uređaja. Često se primjenjuje za kontrolu kakvoće raznih postupaka površinske obrade.

Mikro-tvrdoća je tvrdoća materijala određena utiskivanjem indentora u površinu materijala. Otisci su najčešće vrlo mali tako da se moraju mjeriti mikroskopom. Moguće je mjeriti tvrdoću različitih mikrokonstituenata unutar mikrostruktura. Mikroindentori utiskuju svoj vrh u uzorak neprekidno mjereći primijenjeno opterećenje, dubinu i vrijeme prodiranja.

Nano-tvrdoća se koristi kod ispitivanja tvrdoća različitih faza, uključaka u mikrostrukturi, uz pomoć mikroskopa. Nano test mjeri tvrdoću sa penetracijom jako malih sila (veličina 1 nano Newton) pomoću specijalnih uređaja.

Ispitivanja tvrdoće neznatno oštećuju površinu ispitivanog predmeta pa se svrstavaju u nerazorna ispitivanja. Kod materijala koji imaju malu ili nikakvu mogućnost deformacije (polimeri, guma...) tvrdoća se mjeri tako da se mjeri deformacija materijala u času djelovanja sile [3].

Najpoznatije metode mjerenja tvrdoće su:

- Brinell
- Rockwell
- Vickers

Postoje naime i druge metode kao što su Baumann, Poldi, Shore, ali one se rjeđe koriste. U ovom radu ćemo ukratko opisati 3 glavne metode, ali najviše ćemo se zadržati na Vickers metodi pošto je ona najzastupljenija.

2. BRINELL METODA

Metodu je pronašao švedski inženjer J. A. Brinellu (1849 – 1925). Tvrdća po Brinellu (oznake HB) je omjer primijenjene sile i površine otiska. Kod ove metode tijelo koje se utiskuje u metal je kuglica od kaljenog čelika standardnih dimenzija promjera **10; 5; 2,5; 2 i 1 mm**. Tijelo koje se utiskuje općenito se naziva penetrator ili indentor. Iznimno za mjerenje tvrdih metala koristi se kuglica od tvrdog metala. Uređaj za mjerenje tvrdoće po Brinellu koristi silu od 4.903,325 N za meke materijale (bakar, mjed) i tanke uzorke. Sila od 14.709,975 N se upotrebljava za aluminij, te sila od 29.419,95 N se upotrebljava za željezo i čelik. Promjer otiska d se mjeri pomoću povećala, tipično 2 do 6 mm, a sama tvrdoća se proračunava pomoću jednadžbe:

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

gdje su:

F – sila u N

D – promjer kuglice

d – promjer baze kugline kalote (otiska) u mm

Postoje i tablice za dobivanje Brinellove tvrdoće HB, direktno iz promjera otiska. Za preračunavanje u SI jedinice, $1\text{kp} \approx 9,81\text{ N}$. Primjer oznake Brinellove tvrdoće je: **HB 10/3000/15 = 250**. što znači da je Brinellova tvrdoća ispitana sa kuglicom promjera **10 mm**, sa opterećenjem od **29.419,95 N** u trajanju opterećenja od **15 sekundi** i iznosi **250**. Brinellova metoda se koristi za meke i srednje tvrde materijale. Otisci su veliki i duboki, tako da test daje jednu srednju vrijednost za višefaznu mikrostrukturu materijala, ali probni uzorci se često razaraju. Ukoliko je promjer otiska (d) manji od $0,24D$ znači da je primijenjena premala sila (F), odnosno ukoliko je $d > 0,6D$ znači da je sila (F) bila prevelika. Nadalje veličina kuglice koju treba primijeniti i iznos sile ograničeni su debljinom uzoraka, a ograničenja se računaju sljedećim izrazom:

$$S \geq 8 \cdot h$$

gdje je:

S – debljina uzorka

h – dubina prodiranja kuglice

$$h = \frac{F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot HB}, \text{ mm}$$

Ukoliko bi debljina uzorka bila manja od propisane, bila bi onemogućena potpuna, neometana plastična deformacija u materijalu, a s time i ispravan rezultat u mjerenju. S kuglicom od kaljenog čelika dozvoljeno je mjeriti tvrdoću do vrijednosti HB=450 dok se za tvrde materijale mora koristiti kuglica od tvrdog metala.

Prednosti Brinell metode:

- Lako mjerenje veličine otiska, dovoljno je mjerno povećalo
- Metoda je selektivna – mjerno područje od 0 – 450 jedinica za čeličnu kuglicu
- Jednostavna priprema površine – dovoljno je grubo brušenje.

Nedostaci Brinell metode:

- Ne mogu se mjeriti materijali visoke tvrdoće
- Tvrdoća je ovisna o opterećenju, pa treba odabrati odgovarajuću silu
- Otisak je relativno velik, pa funkcionalno ili estetski nagrđuje površinu (ukoliko se tvrdoća mjeri na proizvodu a ne na uzorku)

3. ROCKWELL METODA

Kod ove metode upotrebljava se više vrsta penetratora, za meke materijale upotrebljava se mala čelična kuglica, a za tvrde materijale dijamantni stožac. Koja se vrsta penetratora koristi može se uočiti iz oznake za tvrdoću: **HRC** – "cone" = stožac, ili **HRB** – "ball" = kuglica. Dijamantni stožac ima vršni kut 120° i radijus zaobljenja 0,2 mm, dok promjeri čeličnih kuglica iznose 1/16", 1/8", ili 2,5 mm. HRB (ball) test koristi se za meke i srednje tvrde materijale (aluminij, meki čelik i sl.) dok se HRC (cone) koristi za tvrde materijale (kaljeni čelik).

Kod Rockwell metode se za razliku od ostalih metoda mjeri dubina prodiranja penetratora, a ne veličina otiska. Zato se kod ove metode vrijednost tvrdoće očitava na skali tvrdomjera, nakon rasterećenja. Određivanje Rockwellove tvrdoće ostavlja na površini ispitivanog dijela samo manje otiske, izvodi se jednostavno i brzo pa se stoga primjenjuje u serijskoj industrijskoj proizvodnji.

Opis postupka:

Penetrator se prvo opterećuje predopterećenjem F_0 čime se dobije i početna točka mjerenja tvrdoće. Mjerenje tvrdoće vrši se glavnim opterećenjem F_1 . Nakon što smo izvršili glavno opterećenje te rasteretili uzorak slijedi očitavanje iznosa tvrdoće koje je jednako dubini prodiranja penetratora (od glavnog opterećenja) [4].

Prednosti Rockwell metode:

- Mjerenje je brzo, tvrdoća se očitava na skali tvrdomjera
- Nije potrebna brižljiva priprema površine

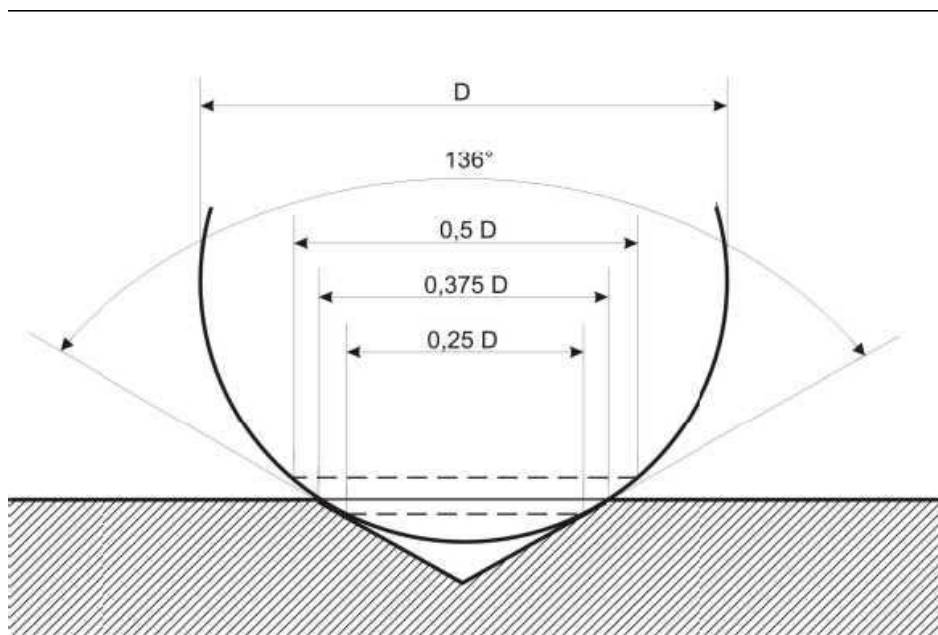
Nedostatci Rockwell metode:

- Slaba selektivnost metode. Teoretsko mjerno područje Rockwell metode kreće se od 0 – 100 HRC, ali u praksi to područje se kreće od 20 – 70 HRC. Stoga se ova metoda koristi samo u pogonima, i to gotovo isključivo na toplinski obrađenim čelicima.
- Nepreciznost: ± 2 HRC

4. VICKERS METODA

Vickers metoda je standardna metoda mjerenja tvrdoće metala, posebno onih s vrlo tvrdom površinom. Izumljena je 1920-ih godina od strane inženjera tvrtke Vickers, Ltd., Velika Britanija, kao alternativna metoda mjerenja tvrdoće materijala. Posljedično tome uspostavlja se skala usporedivih brojeva koji točno odražavaju široko područje tvrdoće čelika. Određivanje tvrdoće (mikrotvrdoće) po Vickersu proizišlo je iz Brinellovog postupka. Vickers metoda slična je Brinellovoj metodi mjerenja tvrdoće, no otklanja osnovne nedostatke Brinellove metode (opisane u poglavlju 2.). Prvi nedostatak Brinellove metode uklonjen je uporabom najtvrđeg materijala kao penetratora, a drugi oblikom penetratora.

Kao penetrator služi dijamantna četverostrana piramida s kutem od **136°**, tako da i tvrdoća najtvrdih tehničkih materijala može biti izmjerena. Kut od 136 ° nije odabran slučajno. Taj kut zatvaraju tangencijalne ravnine na Brinellovu kuglicu pri optimalnoj veličini otisnuća $d=0,37 \cdot D$ (slika 1).



Slika 1: Grafički prikaz izbora kuta od 136° [2]

Po definiciji, tvrdoća po Vickersu jednaka je onoj Brinellovoj, a izračunava se izrazom:

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S}$$

Pri čemu je F sila izražena u N, a S površina otiska izražena u mm^2 nakon rasterećenja. Budući da se mjeri dijagonala baze otiska (kvadrata), površina otiska izražava se s pomoću dijagonale " d " te izlazi:

$$HV = \frac{F \cdot 0,188}{d^2}$$

Pri čemu je F , sila u N, a d , srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otisnuća, izraženu u mm.

Proračunavanje tvrdoće nije ovisno o veličini indentora, a indentor se može primijeniti za sve materijale neovisno o vrijednosti tvrdoće. Veličina uzorka je limitirana kapacitetom mjernog instrumenta. Iznos sile kojima se vrši indentacija uobičajeno iznose od 49 do 980 N. No kod Vickers metode koriste se i niža opterećenja. Ukoliko sila utiskivanja iznosi od 1,96 do 49 N, govori se o semimikrotvrdoći. Mjerenje semimikrotvrdoće provodi se prvenstveno pri ispitivanju tvrdoće tankih uzoraka te tankih slojeva. Za mjerenje tzv. mikrotvrdoće rabe se opterećenja niža od 1,96 N. Na taj način moguće je mjerenje tvrdoća pojedinih faza, npr. kristalnih zrna u mikrostrukturi materijala. Trajanje opterećivanja penetratora iznosi 10 do 15 sekundi, a iznimno se za mekane materijale može i produljiti. U tablici 2 dan je prikaz iznosa sila utiskivanja kod Vickers metode.

Tablica 2: Skale Vickers tvrdoće [3]

Konvencionalna tvrdoća		Semitvrdoća		Mikrotvrdoća	
Oznaka	Sila utiskivanja F, N	Oznaka	Sila utiskivanja F, N	Oznaka	Sila utiskivanja F, N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	Hv 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

Iznos tvrdoće nije stvarno svojstvo materijala nego je empirijska vrijednost koja se mora promatrati zajedno s eksperimentalnim metodama i korištenom skalom tvrdoće. Prilikom mjerenja, razmak između otisaka mjerenja mora biti veći od 2,5 dijagonale otiska kako bi se izbjegla interakcija među područjima na kojima je izvršeno mjerenje tvrdoće. Ovo pravilo vrijedi za čelike

Prednosti Vickers metode

- Jedina skala koja pokriva kompletni raspon tvrdoće
- Široki raspon primijenjenih sila kako bi se zadovoljilo svako područje primjene
- Spada u skupinu nerazornih ispitivanja, uzorak se može koristiti nakon ispitivanja

Nedostaci Vickers metode

- Glavni nedostatak je potreba optičkog mjerenja veličine uzorka (subjektivnost mjeritelja)
- Spora metoda, ispitivanje traje 30 – ak sekundi isključivši pripremu uzorka.

Ovdje smo opisali glavne nedostatke Vickers metode, no međutim postoji niz drugih faktora koji mogu utjecati na mjerenje tvrdoće, pa i samim time na konačan rezultat mjerenja. Prema literaturi značajnije pogreške koje mogu utjecati na konačan rezultat mjerenja su:

- Pogreške uređaja za mjerenje
- Utjecaj okoline: - vibracije
- temperatura
- Indentor
- Ispitni uzorak

4.1 Oprema za mjerenje tvrdoće metodom Vickers

Osnovne komponente svakog tvrdomjera su mehanizam za ostvarivanje odgovarajuće sile opterećivanja i dio za mjerenje duljine otiska ili dubine prodiranja indentora u ispitni uzorak. Prema ovomu, u daljnjem tekstu kao osnovne komponente tvrdomjera smatrat će se sustav za opterećivanje i sustav za mjerenje koji su najčešće povezani u jedan sklop (tvrdomjer).

Glavni elementi sustava za opterećivanje su postolje, mehanizam za opterećivanje i indentor. Sustavi za opterećivanje kod tvrdomjera po metodi Vickers prvenstveno se razlikuju po načinu ostvarivanja potrebnog opterećenja. Danas se najviše primjenjuju sustavi opterećivanja pomoću utega (bolje mjerne sposobnosti) ili pomoću deformacijskog tijela. Prema mehanizmu prijenosa opterećenja na indentor sustavi opterećivanja pomoću utega to ostvaruju na dva načina:

- Ostvarivanje opterećenja direktnim djelovanjem utega
- Ostvarivanje opterećenja utezima preko polužnog sustava

Sustavi opterećivanja pomoću odgovarajućeg deformacijskog tijela omogućuju izrade tvrdomjera manjih dimenzija i lakše povezivanje sa sustavima za direktno očitavanje veličine otiska. S obzirom na funkciju sustava za opterećivanje s jedne strane ih se može smatrati mjerilima sile odnosno preciznije rečeno davateljima točno određene vrijednosti sile (princip stabilnih etalona sile). Stoga slično kao i kod etalonskih mjerila sile, najbolje mjerne sposobnosti daju sustavi s direktnim opterećenjem pomoću utega a to znači da su njihove najbolje postizive mjerne nesigurnosti $\leq 0,002 \%$.

Sustavi za očitavanje mjere veličinu otiska ili dubinu prodiranja indentora ovisno o vrsti metode. Danas se najčešće primjenjuju različiti mjerni mikroskopi za sustave očitavanja kod metoda koje mjere veličinu otiska, dok kod metoda gdje se mjeri dubina prodiranja u primjeni su laserski mjerači, mjerne trake ili deformacijska tijela. Sustavi za očitavanje veličine otiska za Vickers metodu su mjerni mikroskopi visoke rezolucije s mjernom nesigurnošću i od nekoliko nanometara ako se radi o mjerenjima mikrotvrdoće ili nanotvrdoće.

4.2 Faktori koji mogu utjecati na vrijednosti tvrdoća

Matematički se korektno dokazuje konstantnost Vickersove tvrdoće pri promjeni opterećenja, dok praktična mjerenja pokazuju da ta tvrdoća ipak nije konstantna jer na nju mogu utjecati mnogi faktori.

4.2.1 Pogreške uređaja za mjerenje [2]

Konstrukcija, sastavljanje i uvjeti uređaja za mjerenje tvrdoće (ovdje se podrazumijeva i etalonski i ispitni tvrdomjeri) su vrlo značajni za pouzdanost dobivenih rezultata. Jako trenje pri dovodenju odgovarajućeg opterećenja može uzrokovati naprezanja i nemogućnosti ispravnog ponavljanja mjerenja. Čak i uređaji koji pravilno rade mogu dati loše rezultate zbog jakog trenja u sustavu za primjenu sile. Slični doprinos nesigurnosti, zbog malog trenja, se može očekivati kod sustava za mjerenje dubine otiska.

Jaka iskrivljenost okvira uređaja i sustava koji podržava ispitni uzorak mogu također uzrokovati probleme. Odstupanja od 1 do 3 jedinice tvrdoće nisu rijetkost zbog nepravilnog pridržavanja ispitnog uzorka i jakih izobličenja okvira tvrdomjera.

Sustav za opterećivanje mora stalno davati točne sile. Vrlo kvalitetna mjerna oprema mora biti u stanju primjenjivati sile u granicama od $\pm 1 \% F$ na razini korisnika ili čak od $\pm 0,1 \% F$ nazivne sile kod etalonskih tvrdomjera. Pri procesu djelovanja opterećenja zahtjeva se da brzina i vrijeme zastoja, u kojem se opterećenje primjenjuje, budu definirani. Varijacije cikličkih parametara ispitivanja, koje se mogu javiti kod nekih ručno kontroliranih tvrdomjera, mogu dovesti do varijacija u rezultatu (npr. kod Rockwell metode do ± 1 HRC pri 60 HRC). Mekši materijali i materijali koji su podložni mehanizmu hladnog očvrsnuća, mogu dati značajno veće nesigurnosti.

Mjerenja koja je proveo British Iron ukazuju na značajnost pogrešaka koje mogu dati različiti aparati. Naime, oni su mjerili sedam različitih materijala na jedanaest različitih aparata. Nakon tih ispitivanja došlo se do zaključka da aparati konstruirani na principu vage daju

prosječno više vrijednosti nego aparati na oprugu. Prema POLLARD – u [1] sve greške se mogu podijeliti na:

- Simetrične (slučajne)
- Asimetrične (sistematske)

Utjecajni faktori na greške slijede iz formule:

$$HV = \frac{2F \cdot \sin \varphi}{d^2}$$

te se vidi da to mogu biti greške opterećenja i pogreške indentora. Među pogreške opterećenja spada i utjecaj tromosti masa uređaja. Prema TOWNED – u [1] proceduralna greška tvrdoće uslijed tromosti proporcionalna je izrazu:

$$\frac{m \cdot v^2}{F \cdot d}$$

gdje je:

m – masa ekvivalentna kočionim masama aparata koncentrirana na penetratoru

v – brzina otpuštanja indentora

d – dužina dijagonale

F – ispitna sila

Vidi se da će greška ove vrste biti tim manja, što je manja masa m i brzina penetratora v , a što je veća ispitna sila F i utisnuta dijagonala d . Greške ove vrste nisu velike u usporedbi s drugim vrstama grešaka. Vrlo važno je odabrati pravilnu brzinu spuštanja indentora prije utiskivanja u uzorak. Postoje vrlo različite preporuke, ali najprikladnijim se čini prijedlog GIRSCHI – a [1] koji je dan u tablici 3:

Tablica 3: Brzine opterećenja

Opterećenje N	Brzina opterećenja mm/s
0,001	0,07
0,0031	0,104
0,01	0,38
0,031	0,88
0,1	2,2

4.2.2 Utjecaj okoline

Ovo je najčešći uzrok pogrešaka. **Temperatura** okoliša može značajno utjecati na rezultate mjerenja tvrdoće, naročito kod manjih duljina dijagonala otiska. Na primjer, kod donje granice duljine dijagonale od 20 μm za Vickers metodu ili minimalne dubine prodiranja indentora od samo 6 μm do 7 μm za Rockwell metodu utjecaj okoliša može dovesti do velikih rasipanja rezultata mjerenja. Shodno odgovarajućim normama, propisano temperaturno područje za ispitna mjerenja je 10 °C do 35 °C a za umjeravanje referentnih pločica je 23 °C \pm 5 °C.

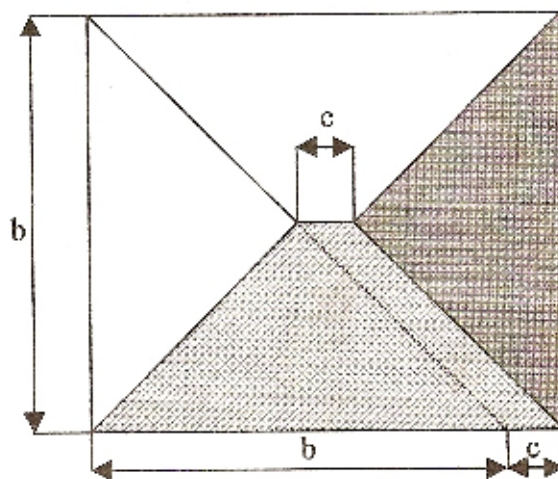
Vibracije, električne interferencije i nedostatak čistoće mogu dovesti do značajnih problema koji se teško kvantificiraju. Mjerenja mikro tvrdoće s ultra malom silom, zahtijevaju naravno potpunu odsutnost vibracija, dok zahtjevi za vibracijama pri ispitnim silama iznad 200 mN nisu tako kritični. Vibracije daju dodatno opterećenje, pa zato i nižu tvrdoću od stvarne. Ovime su se bavili npr. MOTT i FORD [2], koji su ispitivali utjecaj gumene podloške pod aparatom (za prigušenje vibracija) kod ispitivanja tvrdoće bakra.

Tablica 4: Utjecaj vibracija na tvrdoću

Sila F , N	Bez podloške	S podloškom
	HV	HV
0,0025	9,58	11
0,025	9,88	9,79
0,25	9,48	9,28

4.2.3 Utjecaj indentora (penetratora) [1]

Vrlo male pogreške će nastupiti ako kut Vickersove piramide nije 136° . Npr. ako se on izvede sa 137° greška će iznositi 0,34%. Najveća i najčešća greška je pojava tzv. krovnog brida na indentoru, koje nastaju ako se pri brušenju sve četiri plohe ne sastaju u istoj točki (slika 2).



Slika 2: Prikaz greške kod indentora

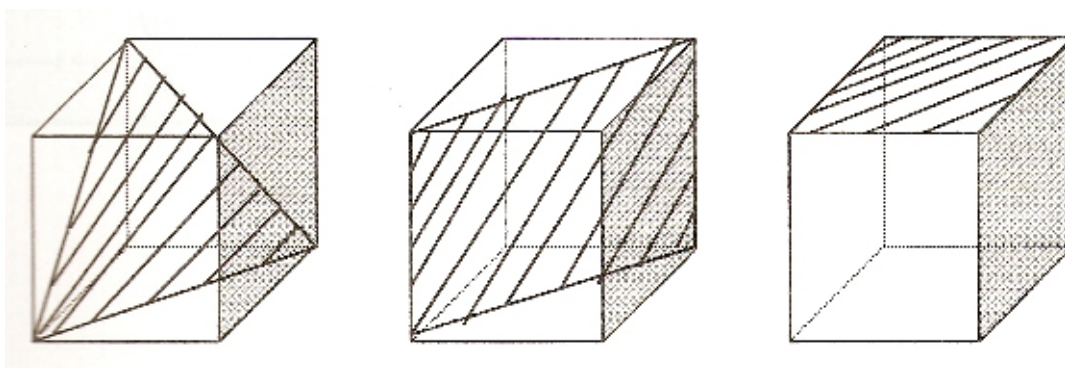
4.2.4 Utjecaj ispitnog uzorka [1]

Debljina ispitnog uzorka može utjecati na mjerenu tvrdoću ukoliko se odabere kriva metoda. Što je dublji otisak, to debljina ispitnog uzorka mora biti veća i za svaku metodu je definirana minimalna debljina uzorka (pr. vidi poglavlje 2). Pretanki uzorak će pokazati veću tvrdoću zbog efekta nakovnja. Uz to, ukoliko je uzorak pretanak kako bi podržao ispitnu silu tijekom mjerenja, može se oštetiti i sam indentor, a to ulijeće na pouzdanost svih daljnjih mjerenja koja se provode tim indentorom.

Kvaliteta površine ispitnog uzorka također može značajno utjecati na rezultate mjerenja tvrdoće. Grublja površina zahtijeva veću silu i/ili veći indenter, kako bi proizveo veći otisak. Brinell – ova metoda je najprikladnija, jer na nju manje utječe gruba površina, nego na Rockwell – ovu ili Vickers – ovu metodu.

Čistoća površine je također jedan od kritičnih faktora mjerenja tvrdoće. Ukoliko se na površini nalaze masti, oksidi ili prašina, to može uzrokovati značajna odstupanja rezultata; štoviše, ispitni materijal ili referentna pločica se mogu ireverzibilno oštetiti.

Također i vrsta ispitnog materijala ima veliku važnost kod rezultata mjerenja tvrdoće. Prema MUKAI – u [1] za Al – monokristal najtvrđa ploha je (111), zatim (110), a onda (001). To je prikazano na slici 3.



Slika 3: prikaz najtvrdih ploha

Ove razlike mogu biti i prilično velike. PERRYMAN [1] je našao sljedeće razlike u tvrdoćama:

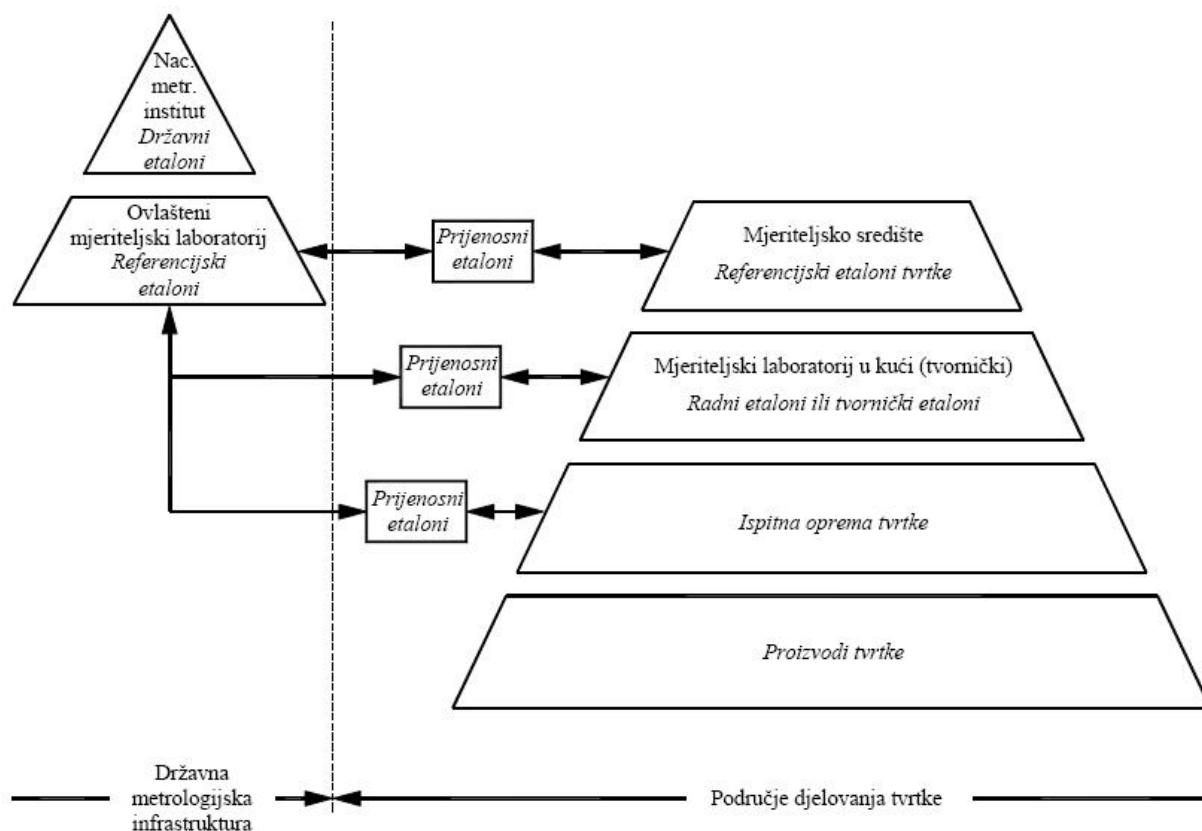
Za Al	do	40%
Za Cu	do	60%
Za Pb	do	25%

Po GEIGER – u [1] kod Cr – Ni austenitnog čelika razlike u zavisnosti o orijentaciji plohe iznose i do 16%.

Nabrojani i ukratko opisani faktori mogu imati prilično utjecaja na mjerenje egzaktne tvrdoće. Eksperimenti pokazuju i dokazuju promjenu tvrdoće kod promjene sile i raznih drugih faktora i na taj način doprinose nemogućnosti izračunavanja egzaktne tvrdoće.

5 UMJERAVANJE OPREME ZA MJERENJE TVRDOĆE [2]

Umjeravanje znači određivanje i dokumentiranje odstupanja pokazivanja mjerila (ili utvrđene vrijednosti tvarne mjere) od dogovorene “istinite” vrijednosti mjerene veličine. To je skup postupaka kojim se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka tvarna mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. To se dokazuje dokumentom – Potvrda o umjeravanju. Postavlja se pitanje koja je svrha umjeravanja a time i provođenja mjerne sljedivosti. Osnovni razlog je da bi se osigurala ujednačenost mjerenja u tvrtki proizvođača proizvoda i kupca koji taj proizvod ugrađuje, odnosno mora postojati jamstvo da proizvođač i kupac mjere “istom mjerom”. Na slici 4 je prikazana hijerarhija umjeravanja u jednoj zemlji gdje je uočljivo kako vlastiti sustav za umjeravanje može uzajamno djelovati s postojećom metrolozijskom infrastrukturom.



Slika 4: Piramida sljedivosti umjeravanja

5.1 Postupak umjeravanja tvrdomjera [2]

Stabilnost skale tvrdoće se u osnovi potvrđuje ovim postupkom za umjeravanje i to u dva koraka:

- a) Direktna metoda umjeravanja -osigurava da tvrdomjeri funkcioniraju pravilno, shodno definiciji tvrdoće i uzimajući u obzir odgovarajuće parametre.
- b) Indirektna metoda umjeravanja s etalonskim pločicama tvrdoće - obuhvaća provjeru karakteristika tvrdomjera kao cjeline.

5.1.1 Direktna metoda umjeravanja

Ovdje će biti prikazan postupak umjeravanja samo primarnih i referentnih etalonskih tvrdomjera, te koje zahtjeve oni moraju ispunjavati sukladno normi DIN EN ISO 6507-3. Provođenje umjeravanja, bez obzira da li se radi o etalonskom ili ispitnom tvrdomjeru, mora imati vezu s međunarodnim sustavom jedinica (SI). Direktna metoda se provodi u temperaturnom intervalu $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ako to nije, onda se to mora posebno naglasiti te provesti procjenu utjecaja temperature na sve parametre.

Direktna metoda umjeravanja se sastoji od:

- a) provjere sila opterećivanja,
- b) provjere dijamantnog indentora,
- c) provjere sustava za očitavanje veličine otiska,
- d) provjere ispitnog ciklusa

5.1.1.1. Provjera sila opterećivanja

Provjera sila opterećivanja provodi se, kad je god to moguće, u tri različita položaja sustava za opterećivanje. Provjera mora biti provedena pomoću uređaja za provjeru sile koji mora ispunjavati kriterije klase 0,5 prema normi HRN EN ISO 376 . Ako se koristi neki drugi postupak njegova mjerna nesigurnost mora biti najmanje jednaka onom ostvarenom s uređajem klase 0,5. Svaka izmjerena sila ne smije prekoračiti dozvoljene vrijednosti od nazivne sile:

- a) za konvencionalnu i semimikro tvrdoću $\pm 0,1\text{ }%$,
- b) za mikrotvrdoću $\pm 0,5\text{ }%$.

Za svaku silu i za svaki položaj sustava za opterećivanje potrebno je provesti niz od barem tri mjerenja.

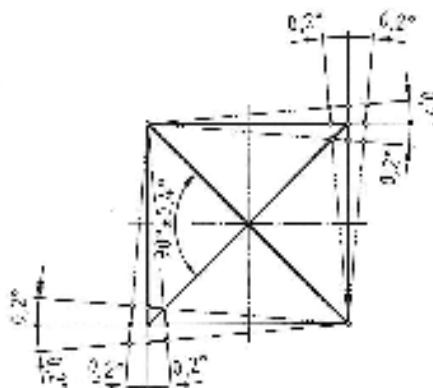
5.1.1.2. Provjera dijamantnog indentora

Provjera dijamantnog indentora provodi se kroz:

a) Provjeru površina četverostrane piramide, koje moraju biti polirane i ne smiju na sebi imati nikakve pogreške ili oštećenja. Sve četiri površine stranica dijamantne piramide moraju biti tako polirane i slobodne od površinskih grešaka da odstupanje ravnoće ne smije prekoračiti vrijednost $0,000\ 3\text{ mm}$.

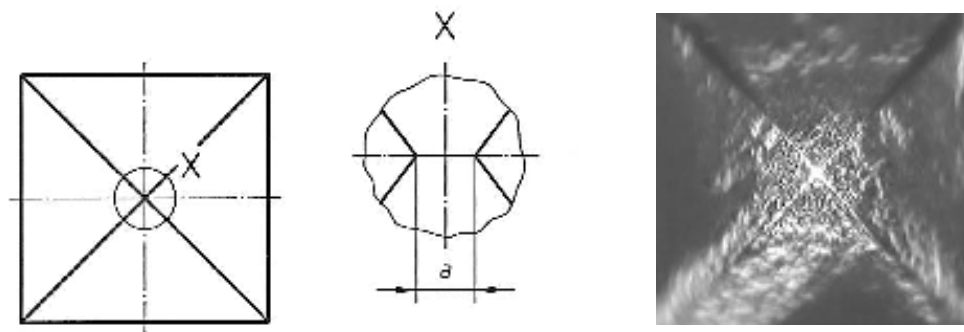
b) Provjeru kuteva:

- kut između nasuprotno položenih površina mora biti $136\pm0,1^\circ$
- kut između osi dijamantne piramide i osi držača indentora (okomito na referentnu površinu) mora biti unutar $0,3^\circ$.
- osnovne stranice piramide međusobno moraju zatvarati kut od 90° a odstupanje tog kuta ne smije biti veće od $\pm 0,2^\circ$ (slika 5.).



Slika 5: Dozvoljena odstupanja površina piramide od kvadratnog oblika

c) Provjeru vrha: sve četiri stranice piramide na vrhu moraju završiti u jednoj točki. Zbog specifičnosti izrade dijamantnih piramida, ovaj zahtjev će biti zadovoljen ako se dvije nasuprotno ležeće stranice sijeku te tako nastaje brid (slika 6). Vrh dijamantne piramide mora se provjeriti pomoću interferencijskog ili visokorazlučivog mjernog mikroskopa.



Slika 6: Vrh dijamantne piramide

5.1.1.3. Provjera sustava za očitavanje veličine otiska

Provjera ovog sustava provodi se s obzirom na mogućnosti očitavanja na mjernoj skali i određuje se prema veličini mjerenja najmanjeg otiska. Mjerni uređaj mora biti provjeren u najmanje pet točaka ravnomjerno raspodijeljenih po cijelom mjernom području. Ova provjera se najčešće provodi pomoću objektmikrometra.

5.1.1.4. Provjera ispitnog ciklusa

Sustav za opterećivanje mora osigurati da vrijeme od početka djelovanja sile opterećivanja pa do postignuća odgovarajuće vrijednosti bude u granicama danim u tablici 5. Isto tako vrijedi i za brzinu približavanja indentora ispitnoj površini.

Tablica 5: Zahtjevi na ispitni ciklus

Područje sile F, N	Vrijeme opterećivanja, s	Brzina približavanja indentora ispitnoj površini mm/s
$F \geq 49,03$	≤ 10	0,05 do 0,2
$1,961 \leq F < 49,03$	≤ 10	0,05 do 0,2
$0,098 \leq F < 1,961$	6 do 8	0,05 do 1

Trajanje opterećivanja iznosi 13 do 15 s a provjera ispitnog ciklusa provodi se s tolerancijom od ± 1 s.

5.1.2. Indirektna metoda umjeravanja

Indirektna metoda umjeravanja se provodi pomoću etalonskih pločica tvrdoće u temperaturnom intervalu 23 ± 5 °C sukladno normi DIN EN ISO 6507-2. Etalonske pločice moraju biti umjerene sukladno normi HRN EN ISO 6507-2. Ukoliko temperatura nije unutar granica kako je navedeno, onda je to potrebno posebno naglasiti i procijeniti utjecaj temperature na ostale parametre. Etalonski tvrdomjer mora biti umjeren ovom metodom za sve sile opterećivanja koje se primjenjuju ili ako se ne upotrebljavaju sve onda najmanje dvije. Za svaku silu opterećivanja moraju biti upotrijebljene najmanje dvije različite etalonske pločice iz slijedećih različitih područja:

- ≤ 225 HV
- 400 HV do 600 HV
- > 700 HV

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1 Uvod

U ovom dijelu želi se pokazati, koliko i u kojoj mjeri pojedini faktori utječu na dobivanje egzaktnih podataka o tvrdoći određenog materijala. U općem dijelu su navedeni faktori, koji mogu utjecati na vrijednost mikrotvrdoće, a u eksperimentalnom dijelu zadatka treba se i praktično utvrditi njihovo moguće djelovanje. Prije svega tu se želi pokazati koliko promjena opterećenja na uređajima za određivanje tvrdoće tijče na vrijednost izmjerenih tvrdoća. Dalje treba pokazati koliko i sami uređaji nisu odnosno jesu točni po pitanju točnosti opterećenja. Osim ovih navedenih faktora, koji u najvećoj mjeri utječu na egzaktnost podataka, tu je i niz već opisanih popratnih faktora kao što su: vibracije, trajanje držanja pod opterećenjem, utjecaj penetratora, **ljudski faktor**... Iako su često zanemarivi njihov utjecaj na točnost podataka nije zanemariv. Mjerenje raznih fizikalnih veličina pa tako i tvrdoće ne mogu se provesti apsolutno točno jer sva mjerenja su podložna pogreškama, čime se mjerni rezultat razlikuje od istinite vrijednosti mjerne veličine. Uz dano vrijeme i sredstva, većina se izvora mjerne pogreške može identificirati, a mjerne se pogreške mogu količinski odrediti i ispraviti. Međutim rijetko ima dovoljno vremena i sredstva za određivanje i potpun ispravak tih mjernih pogrešaka. U ovom radu pokušali smo ispraviti najveće mjerne pogreške te prikazati rezultate što bliže njihovoj stvarnoj vrijednosti.

6.2 Plan eksperimenta

U eksperimentalni dio projekta proveden je postupak mjerenja prijenosnih etalona tvrdoće, obrađeni su dobiveni rezultati mjerenja i provedena je analiza rezultata. Mjerenje se vršilo na tri prijenosna etalona nazivnih tvrdoća redom: 199 HV5, 487 HV5 te 680 HV5 i to pri opterećenju od 9,807 N (HV1), 49,035 N (HV5) te 98,07 N (HV10). Mjerenje se vršilo na tvrdomjeru 1 proizvođača Zwick a nakon toga na referentnom tvrdomjeru 2 proizvođača Indentec Ltd. Na tvrdomjeru 1 smo najprije provjerili silu opterećenja sa dinamometrima od 100 i 500 N. Na referentnim pločicama smo vršili 5 mjerenja i to na način da smo dva mjerenja radili na jednom mjestu, a zatim bi pločicu zakrenuli za 90° te proveli još jedno mjerenje te tako dok ne bi zatvorili puni krug.

Plan eksperimenta je sljedeći:

- Umjeravanje sila na tvrdomjeru 1 sa opterećenjima s dinamometrima od 100 i 500 N
- Umjeravanje sila na tvrdomjeru 2 sa opterećenjima s dinamometrima od 100 i 500 N
- Mjerenje tvrdoće na etalonskim pločicama 199 HV5, 487 HV5 i 680 HV5 na tvrdomjeru 1
- Mjerenje tvrdoće na etalonskim pločicama 199 HV5, 487 HV5 i 680 HV5 na tvrdomjeru 2
- Analiza rezultata

6.3 Osnovni podaci o tvrdomjerima

Tvrdomjer 1

Mjerenje tvrdoće izvršeno je na tvrdomjeru proizvođača Zwick (slika 7) koji se nalazi u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje, čije su osnovne karakteristike prikazane u tablici 6.

Mikrotvrdomjer Zwick sastoji se iz tri jedinice, a to su: radni stol, sustav opterećenja i sustav za očitavanje (mikroskop). Radni stol nam služi za postavljanje uzorka za ispitivanje. Posjeduje dva T utora preko kojih možemo fiksirati uzorak za ispitivanje s pomoću naprave. Osim toga u radnom stolu je smješten modul koji opskrbljuje mikroskop strujom. Sustav za opterećenje i mikroskop se naslanjaju na radni stol i mogu se pomoću stupa pokretati vertikalno sve do radnog stola. Opterećenje se direktno primjenjuje i ima širok raspon od 5g pa sve do 10 kg. Uljna ručica sa cilindrom za utege teži 200 g. Ako želimo veće opterećenje, na cilindar dodajemo utege dok ne postignemo željeno opterećenje. Prilikom opterećivanja potrebno je samo lagano pokrenuti ručicu iz krajnjeg gornjeg položaja, a dalje ona putuje sama u krajnji donji položaj, vršeći opterećenje i stvarajući otisak. Time su izbjegnuti udari o površinu uzorka (tako su mali da su zanemarivi) što pridonosi otklanjanju tog faktora kao utjecajnog. Točno mjerenje mikroskopom osvijetljeno sa svjetlosnim poljem upotrebljava se za mjerenje Vickers, Brinell ili Knoop slike. Jasnoća se može kontrolirati uporabom kontrole svijetljenja u električnom modulu. Sustav osvijetljenja mikroskopa je opremljen sa 6V/10W FLEMENT lampom. Monokular i binokular mjernog mikroskopa povećava 10 X i prilagođava se individualnoj ošttrini oka. Povećanja objektiva mogu biti 10, 40, X, a totalno povećanje je samo pomnoženo sa 10 X. Nakon što smo izvršili opterećenje te vratili mikroskop na sustav za očitavanje, moramo odrediti veličinu otiska. Otisak se postavlja s gornje strane statične linije. Nakon tako postavljenog otiska vršimo pomicanje pokretnih linija (treba napomenuti da prije očitavanja pokretna linija treba biti poklopljena sa nepokretnom linijom, a skala u tom trenutku na nuli), sve dok ne dođe iznad otiska kao što je prikazano na slici. Nakon toga vršimo očitavanje [1].

Tablica 6: osnovne karakteristike tvrdomjera 1

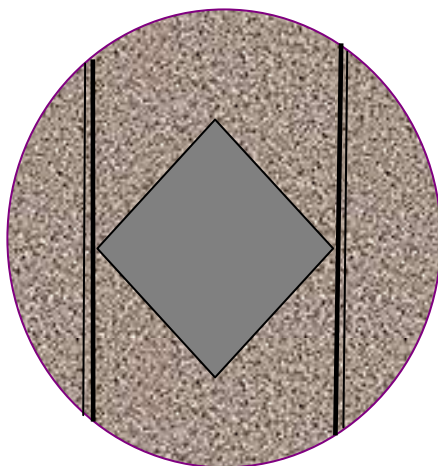
KARAKTERISTIKE TVRDOMJERA 1	
Proizvođač	Zwick, Njemačka
Tip	3212001
Serijski broj	301011
Mjerna nesigurnost	± 2 HV



Slika 7: Tvrdomjer 1

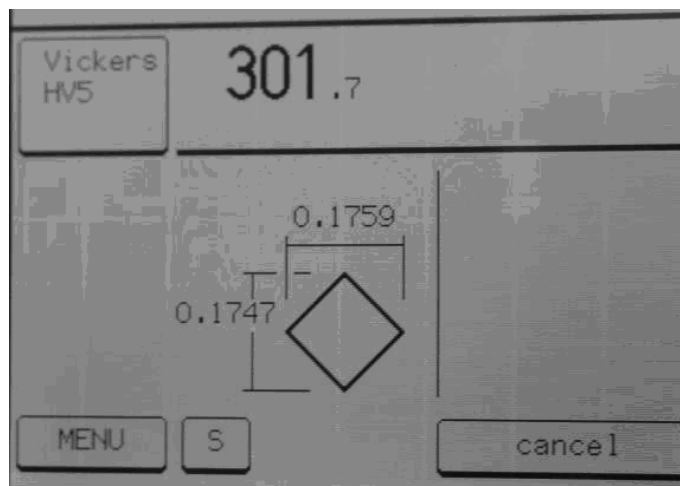
Tvrdomjer 2

Tvrdomjer 2 služi kao referentni tvrdomjer. Način mjerenja sličan je kao na tvrdomjeru 1 ali jednostavnije. Mjerni uzorak se postavi na odgovarajuće postolje koje se može vertikalno pomicati. Nakon što smo na okularu podesili oštrinu slike, na ekranu monitora odredimo parametre mjerenja (opterećenje, brzinu...) ručicom spustimo indenter do ispitnog uzorka i pritiskom na tipku započinjemo mjerenje. Nakon što je uređaj izvršio opterećenje, vratimo indenter na početno mjesto, a mikroskop sam dolazi na mjesto otiska. Mjerni mikroskop je podešen pomoću mjernih linija. Rub svake linije mora se podesiti tako da svojim krajem dodiruje rub otiska, kao što je prikazano na slici 8. Udaljenost između kuteva otiska predstavlja duljinu dijagonale otiska.



Slika 8: Prikaz mjernih linija

Vrijednost duljine dijagonale otiska očitava se na digitalnom displeju mikroskopa. Okular mikroskopa može se rotirati za 90° kako bi očitali vrijednost druge dijagonale otiska. Kada je mjerenje dijagonala izvršeno vrijednosti obje dijagonale prikazat će se na digitalnom displeju s očitanom vrijednošću tvrdoće kako je prikazano na slici 9. Tvrdomjer 2 je prikazan na slici 10, a osnovne karakteristike dane su u tablici 7.



Slika 9: Displej tvrdomjera 2

Tablica 7: Osnovne karakteristike tvrdomjera 2

KARAKTERISTIKE TVRDOMJERA 2	
Proizvođač	Indentec, Engleska
Tip	5030 TKV
Serijski broj	05281
Mjerna nesigurnost	± 1 HV



Slika 10: Tvrdomjer 2

6.4 Rezultati mjerenja

Mjerenje smo započeli ponajprije s umjeravanjem sila na tvrdomjeru 1, a zatim na tvrdomjeru 2. Umjeravanje sile opterećenja provedeno je da bi se provjerilo opterećenje kojim se indenter utiskuje u površinu materijala. Ispitivanje opterećenja provedeno je sa dinamometrima od 100 i 500 N te sa mjernim pojačalom. Dinamometar i pojačalo čine mjerni lanac. U tablici 8 dani su podaci o dinamometrima i mjernom pojačalu.

Umjeravani etaloni sastoje se od dinamometra i mjernog pojačala. Dinamometri su tipa Z4, nazivnih sila 100 i 500 N, za tlačno opterećenje. Korišteno je pojačalo tipa MGC plus s uređajem za očitavanje AB12, koji su ugrađeni u zajedničko kućište (slika 11).

Tablica 8: Osnovni podaci o dinamometrima i mjernom pojačalu

PODACI O DINAMOMETRIMA			PODACI O MJERNOM POJAČALU
	Dinamometar 100N	Dinamometar 500 N	
Proizvođač	HBM, Njemačka	HBM, Njemačka	HBM Njemačka
Tip	Z 30	U 1	MGC plus
Serijski broj	052830060	53574 K	



Slika 11: Mjerno pojačalo

Prije provedbe mjernih nizova, tvrdomjer 1 tri puta je predopterećen nazivnim silama od 9,807 N za HV 1, zatim 49,035 N za HV 5, te 98,07 N za HV 10. u tablici 9 prikazani su rezultati mjerenja tvrdomjera 1, a u tablici 10 tvrdomjera 2.

Tablica 9: Rezultati mjerenja sila na tvrdomjeru 1

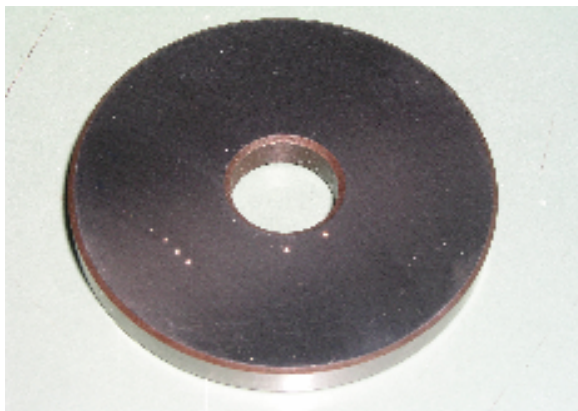
	HV 1 F_{ref.}=9,807 N	HV 5 F_{ref.}=49,035 N	HV 10 F_{ref.}=98,07 N
1.	9,812	49,030	98,020
2.	9,815	49,023	98,015
3.	9,812	49,008	98,038
F_{sr.} [N]	9,813	49,020	98,024

Tablica 10: Rezultati mjerenja sila na tvrdomjeru 2

	HV 1 F_{ref.}=9,807 N	HV 5 F_{ref.}=49,035 N	HV 10 F_{ref.}=98,07 N
1.	9,798	49,093	98,130
2.	9,796	49,04	98,120
3.	9,797	49,062	98,124
F_{sr.} [N]	9,797	49,065	98,125

Rezultati srednjih vrijednosti sila ukazuju nam da će tvrdomjer 1 opterećivati indenter odgovarajućom silom prilikom mjerenja.

Nakon što smo provjerili ispravnost iznosa opterećenja, možemo započeti sa mjerenjem tvrdoća referentnih pločica (etalona). Pločice su okruglog oblika izrađene od čelika. Prije samog mjerenja očistili smo pločice od otisaka prstiju, masnoće i raznih drugih nečistoća kako bi slika pod mikroskopom bila što čišća. Slika 12. prikazuje izgled referentne pločice, a u tablici 11. dane su osnovne informacije o pločicama.



Slika 12: Izgled referentne pločice

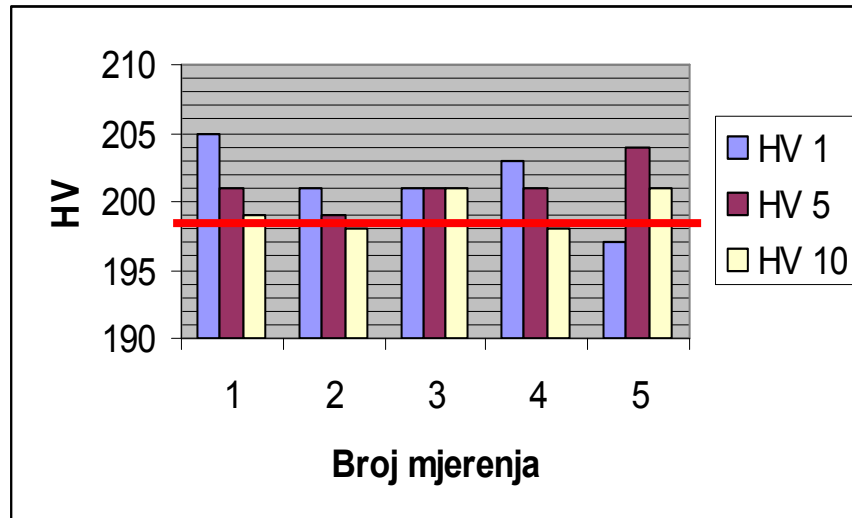
Tablica 11: Osnovni podaci o etalonskim pločicama

	ETALON 1	ETALON 2	ETALON 3
Proizvođač	Werko	Werko	Werko
Oznaka	HV 0266	HV 0292	HV 018
Tvrdoća	199 HV5	487 HV5	680 HV5

U tablici 12. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 1 na tvrdomjeru 1.

Tablica 12: Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 1 na tvrdomjeru 1

	HV 1		HV 5		HV 10	
Br. mj.	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,095	205	0,2152	201	0,305	199
2.	0,096	201	0,2155	199	0,306	198
3.	0,096	201	0,2152	201	0,303	201
4.	0,095	203	0,2152	201	0,306	198
5.	0,097	197	0,2132	204	0,304	201
HV _{sred.}	201,4		201,2		199,4	

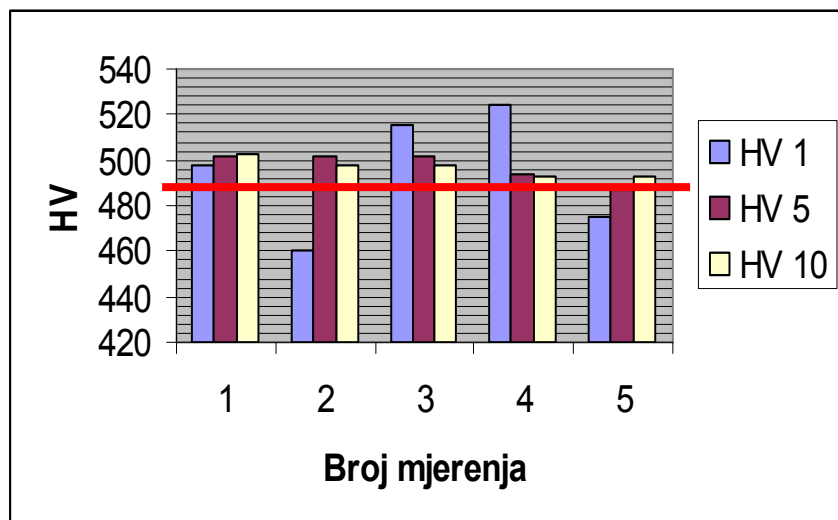


Slika 13: Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće referentne pločice 1 na tvrdomjeru 1

U tablici 13. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 1.

Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 1

Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0610	498	0,1356	502	0,1915	503
2.	0,0635	460	0,1355	502	0,1925	498
3.	0,0600	515	0,1357	502	0,1925	498
4.	0,0595	524	0,1367	494	0,1940	493
5.	0,0625	475	0,1382	475	0,1937	493
HV _{sred.}	494,4		497,4		497	

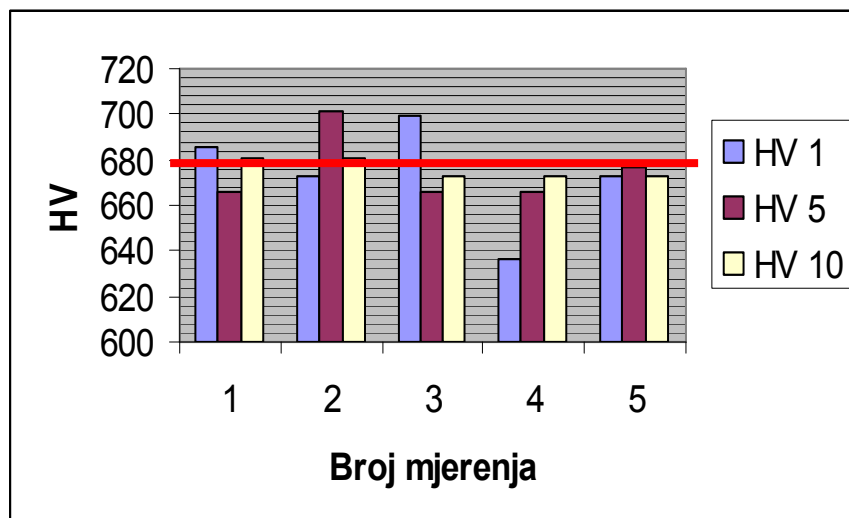


Slika 14: Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 1

U tablici 14 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 1.

Tablica 14: Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 1

Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0520	686	0,1175	666	0,1645	681
2.	0,0525	673	0,1150	701	0,1650	681
3.	0,0515	699	0,1180	666	0,1660	673
4.	0,0540	636	0,1175	666	0,1655	673
5.	0,0525	673	0,1170	677	0,1655	673
HV _{sred.}	673,4		675,2		676,2	



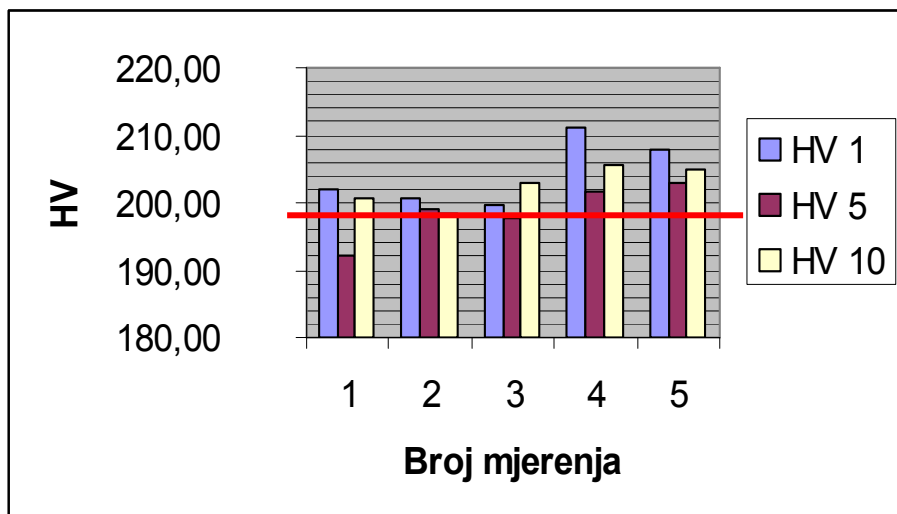
Slika 15: Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 1

Nakon što smo izvršili mjerenja na tvrdomjeru 1, ista smo napravili na tvrdomjeru 2.

U tablici 15 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće na referentnoj pločici 1 na tvrdomjeru 2.

Tablica 15: Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 1 na tvrdomjeru 2

Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0932	202	0,2211	192	0,3039	200,7
2.	0,0961	200,7	0,2162	198,9	0,3043	198,4
3.	0,0954	199,1	0,2166	197,6	0,3019	202,9
4.	0,0918	211,2	0,2143	201,8	0,3003	205,6
5.	0,0930	208	0,2124	203	0,3007	205
HV _{sred.}	204,2		198,66		202,52	

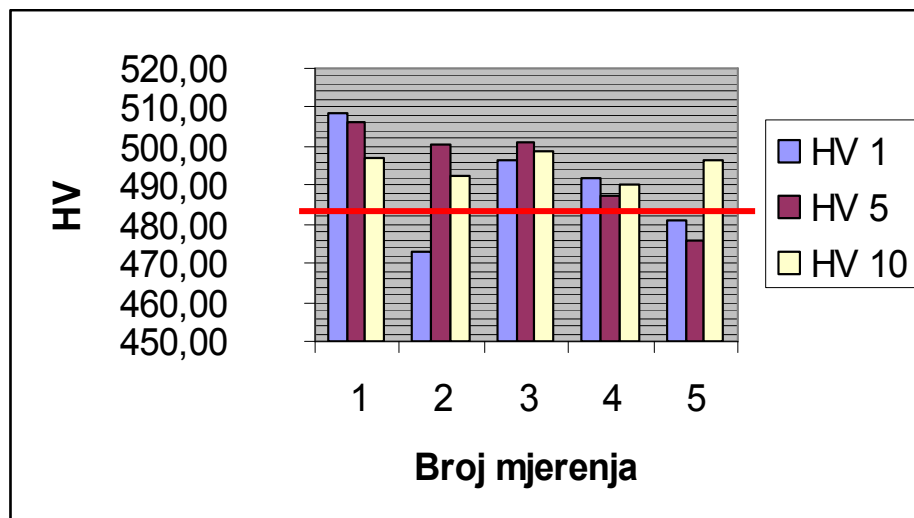


Slika 16: Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće referentne pločice 1 na tvrdomjeru 2

U tablici 16 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 2.

Tablica 16: Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 2

Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0604	508,3	0,1362	506,4	0,1922	497,3
2.	0,0627	473,2	0,1356	500,5	0,1932	492,2
3.	0,0620	496,7	0,1365	501,2	0,1928	498,8
4.	0,0611	491,8	0,1387	487,5	0,1948	490,1
5.	0,0612	480,8	0,1407	475,7	0,1919	496,2
HV _{sred.}	490,16		494,26		494,92	

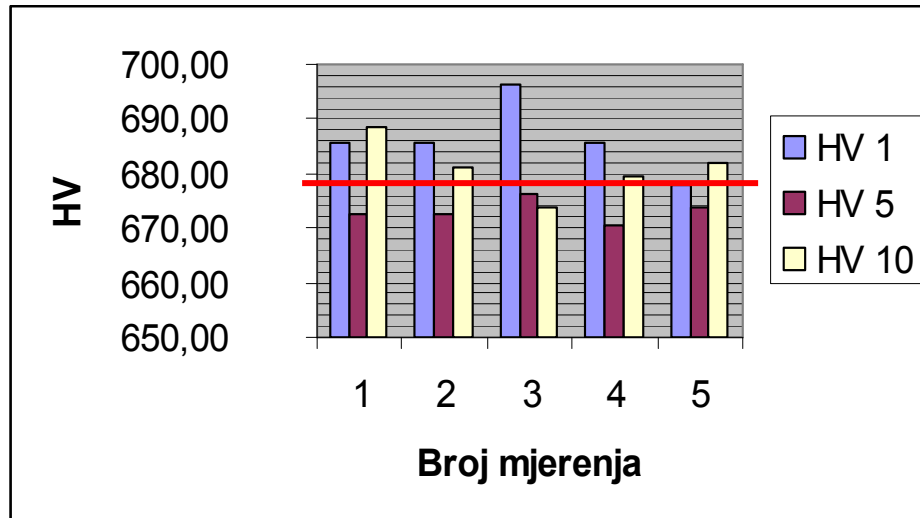


Slika 17: Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće referentne pločice 2 na tvrdomjeru 2

U tablici 17 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 2

Tablica 17: Rezultati mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 2

Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0514	685,7	0,1171	672,7	0,1644	688,6
2.	0,0508	685,7	0,1161	672,7	0,1659	681,1
3.	0,0509	696,4	0,1187	676,1	0,1660	673,7
4.	0,0515	685,7	0,1169	670,4	0,1659	679,4
5.	0,0500	677,9	0,1172	673,8	0,1634	691,9
HV_{sred.}	686,28		673,14		682,94	



Slika 18: Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće referentne pločice 3 na tvrdomjeru 2

Kao što smo već ranije opisali, postoje razlike između tvrdomjera. To se vidi na iznosima tvrdoća. Uzrok te razlike u tvrdoćama leži i u možda najvećem nedostatku Vickers metode, a to je subjektivnost mjeritelja. Naime, iako je tvrdomjer 2 zapravo u potpunosti kompjutoriziran uređaj, očitavanje vrijednosti dijagonala otiska vrši sam mjeritelj preko okulara mikroskopa. Ne mora se posebno isticati da dva mjeritelja na istom otisku neće najvjerojatnije dobiti u potpunosti iste rezultate tvrdoća.

7. ANALIZA REZULTATA

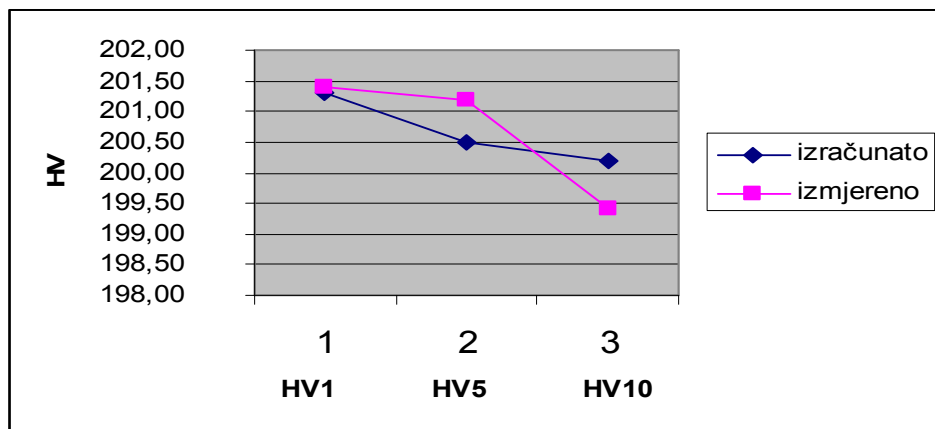
Nakon što smo proveli ispitivanje i dobili rezultate tvrdoća etalonskih pločica, proveli smo analizu rezultata kako bi provjerili točnost rezultata a time i samih uređaja za ispitivanje tvrdoće. Naime za analiziranje rezultata najvažniji podaci su nam sila utiskivanja i veličina dijagonale koju načini indenter prilikom penetracije u materijal. Te dvije veličine uvrštene su u izraz po kojemu računamo tvrdoću po Vickersu.

$$HV = F \cdot \frac{0,1891}{d^2}$$

U sljedećim tablicama dat ćemo prikaz izračunatih vrijednosti tvrdoća, a u dijagramima ćemo prikazati razlike između izmjerenih i izračunatih vrijednosti.

Tablica 18: Rezultati izračunatih vrijednosti tvrdoće za referentnu pločicu 1 na tvrdomjeru 1

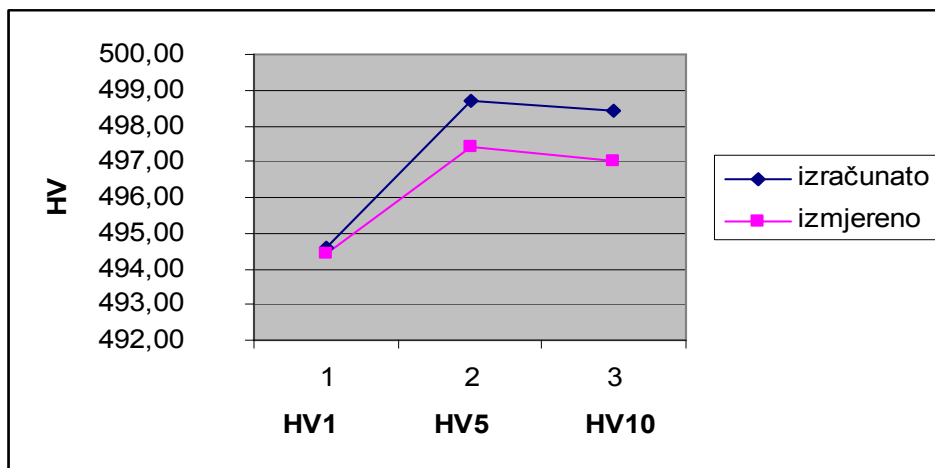
Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,095	205,6	0,2152	200,1	0,305	199,2
2.	0,096	201,3	0,2155	199,6	0,306	197,9
3.	0,096	201,3	0,2152	199,6	0,303	201,9
4.	0,095	201,3	0,2152	199,6	0,306	201,9
5.	0,097	197,2	0,2132	203,9	0,304	200,5
HV_{sred.}	201,3		200,5		200,2	



Slika 19: Grafički prikaz razlika izmjerenih i izračunatih vrijednosti tvrdoća referentne pločice 1 na tvrdomjeru 1

Tablica 19: Rezultati izračunatih vrijednosti tvrdoće za referentnu pločicu 2 na tvrdomjeru 1

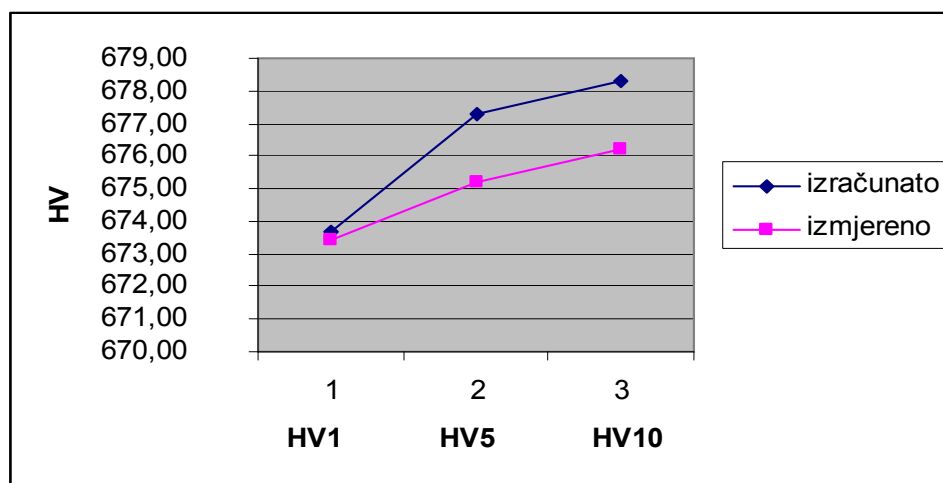
Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0610	498,6	0,1356	504,1	0,1915	505,4
2.	0,0635	460,1	0,1355	504,8	0,1925	500,2
3.	0,0600	515,4	0,1357	503,3	0,1925	500,2
4.	0,0595	524,1	0,1367	496,0	0,1940	492,5
5.	0,0625	475,0	0,1382	485,3	0,1937	494,0
HV_{sred.}	494,6		498,7		498,4	



Slika 20: Grafički prikaz razlika izmjerenih i izračunatih vrijednosti tvrdoća referentne pločice 2 na tvrdomjeru 1

Tablica 20: Rezultati izračunatih vrijednosti tvrdoće za referentnu pločicu 3 na tvrdomjeru 1

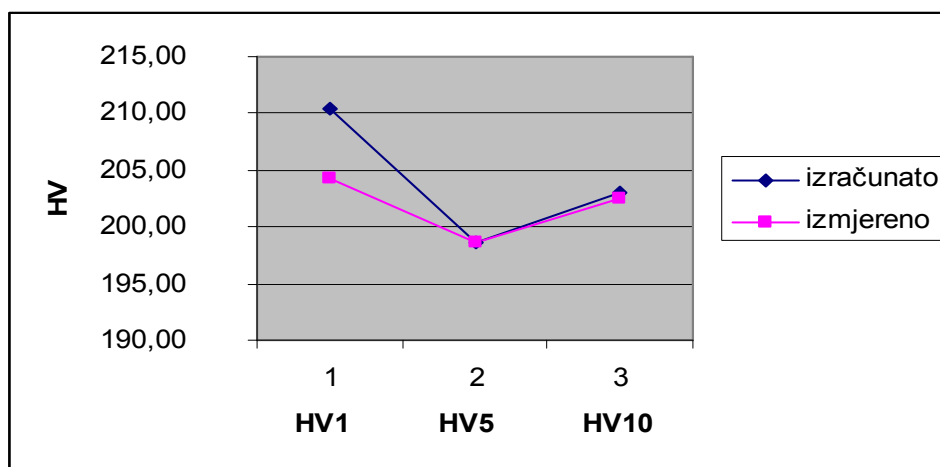
Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0520	686,2	0,1175	671,4	0,1645	685,0
2.	0,0525	673,2	0,1150	700,9	0,1650	680,8
3.	0,0515	699,6	0,1180	665,7	0,1660	672,6
4.	0,0540	636,3	0,1175	671,4	0,1655	676,7
5.	0,0525	673,2	0,1170	677,1	0,1655	676,7
HV _{sred.}	673,7		677,3		678,3	



Slika 21: Grafički prikaz razlika izmjerenih i izračunatih vrijednosti tvrdoća referentne pločice 3 na tvrdomjeru 1

Tablica 21 Rezultati izračunatih vrijednosti tvrdoće za referentnu pločicu 1 na tvrdomjeru 2

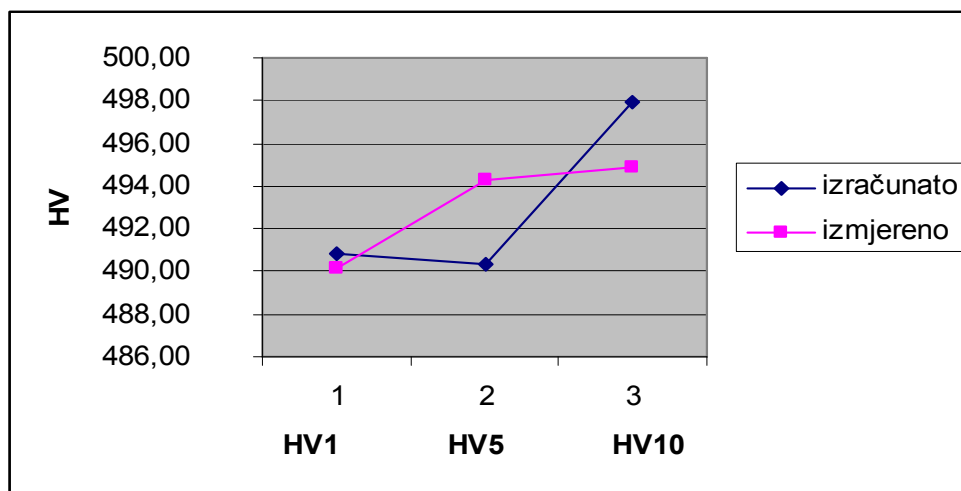
Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0932	213,49	0,2211	189,67	0,3039	200,8
2.	0,0961	200,8	0,2162	198,37	0,3043	200,27
3.	0,0954	203,76	0,2166	197,64	0,3019	203,47
4.	0,0918	220,0	0,2143	201,9	0,3003	205,65
5.	0,0930	214,41	0,2124	205,53	0,3007	205,0
HV_{sred.}	210,49		198,62		203,03	



Slika 22: Grafički prikaz razlika izmjerenih i izračunatih vrijednosti tvrdoća referentne pločice 1 na tvrdomjeru 2

Tablica 22: Rezultati izračunatih vrijednosti tvrdoće za referentnu pločicu 2 na tvrdomjeru 2

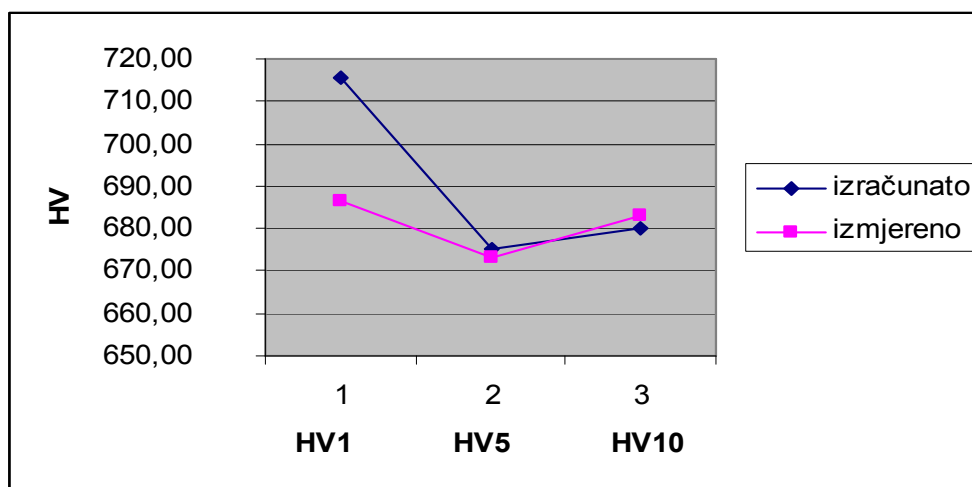
Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0604	508,3	0,1362	499,8	0,1922	502,0
2.	0,0627	471,7	0,1356	504,2	0,1932	496,8
3.	0,0620	482,4	0,1365	497,6	0,1928	498,8
4.	0,0611	496,7	0,1387	482,0	0,1948	488,7
5.	0,0612	495,1	0,1407	468,3	0,1919	503,5
HV _{sred.}	490,84		490,38		497,96	



Slika 23: Grafički prikaz razlika izmjerenih i izračunatih vrijednosti tvrdoća referentne pločice 2 na tvrdomjeru 2

Tablica 23: Rezultati izračunatih vrijednosti tvrdoće za referentnu pločicu 3 na tvrdomjeru 2

Br. mj.	HV 1		HV 5		HV 10	
	d, mm	HV	d, mm	HV	d, mm	HV
1.	0,0514	701,9	0,1171	676,2	0,1644	686,1
2.	0,0508	718,6	0,1161	687,9	0,1659	673,8
3.	0,0509	715,7	0,1187	658,1	0,1660	673,0
4.	0,0515	699,2	0,1169	678,5	0,1659	673,8
5.	0,0500	741,8	0,1172	675,0	0,1634	694,5
HV _{sred.}	715,44		675,14		680,25	



Slika 24: Grafički prikaz razlika izmjerenih i izračunatih vrijednosti tvrdoća referentne pločice 3 na tvrdomjeru 2

8. ZAKLJUČAK

U radu su provedena istraživanja sila na tvrdomjeru 1 i tvrdomjeru 2 te mjerenja tvrdoća referentnih pločica na oba tvrdomjera. Na referentnim pločicama provedeno je ispitivanje s opterećenjima HV1, HV5 i HV10. Na temelju dobivenih rezultata doneseni su sljedeći zaključci:

1. Sile na referentnom i ispitnom tvrdomjeru se razlikuju od stvarnih, normom zadanih vrijednosti. Kod tvrdomjera 1, za silu od 9,807 N razlike su 0,06 %; za silu od 49,03 N razlike su 0,03 % a za silu od 98,07 N razlike su 0,04 %.
Kod tvrdomjera 2 za silu od 9,807 N razlike su 0,1 %; za silu od 49,03 N razlike su 0,03 %, a za silu od 98,07 N razlike su 0,04%. Vidimo da su izmjerene vrijednosti u granicama tolerancije koje propisuje norma DIN EN ISO 6507 – 2.
2. Izračunate i izmjerene vrijednosti tvrdoće razlikuju se kod oba tvrdomjera. U principu su naknadno proračunate tvrdoće sa stvarnim silama nešto veće od izmjerenih, osim kod pločice 199 HV5 na tvrdomjeru 1 i pločice 487 HV5 na tvrdomjeru 2.
3. Zamijećeno je da kod tvrdomjera 1 razlika između izračunatih i izmjerenih vrijednosti raste s porastom opterećenja tj. najmanja razlika je kod opterećenja HV 1, a najveća kod opterećenja HV 10 (osim kod pločice 199 HV5). Kod tvrdomjera 2, naprotiv, veća je razlika između izračunatih i izmjerenih vrijednosti kod manjeg opterećenja (osim kod pločice 487 HV5). To se može pripisati mjernom području pojedinog tvrdomjera. Mjerno područje tvrdomjera 1 je od HV0,2 do HV10, dok je mjerno područje tvrdomjera 2 od HV1 do HV5. Što nas upućuje da će kod tvrdomjera 2 kod opterećenja HV1 biti povećana pogreška mjerenja.
4. Kod oba tvrdomjera uočena su nešto veća rasipanja vrijednosti tvrdoće. To se može pripisati kvaliteti izrade etalonskih pločica, ali i subjektivnosti mjeritelja pri mjerenju. Pogotovo se to odražava kod mjerenja na tvrdomjeru 2 koji ima bolju rezoluciju mjerenja.

LITERATURA

- [1] I. Krezo: Mjerenje mikrotvrdoće kao pomoćna metoda u metalografiji, diplomski rad, Zagreb, 1997.
- [2] Ž. Alar: Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, doktorska disertacija, Zagreb, 2008.
- [3] T. Aleksandrov, Z. Ćorić: Analiza utjecaja instrumenata na vrijednost tvrdoće po metodi Vickers, Zbornik radova, Matrib, FSB, 2008.
- [4] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 2005.
- [5] www.vorax.hr
- [6] M. Franz: materijali III, podloge za vježbe, FSB, 2005/2006
- [7] M. Videc: Postupak umjeravanja prijenosnih etalona sile, završni rad, Zagreb, 2007
- [8] M. Stupnišek, F. Cajner: Osnove toplinske obrade materijala, FSB, 2001.
- [9] Strojarsvo – časopis za teoriju i praksu u strojarstvu, Volume 35, Zagreb, rujan – prosinac, br. 5; 6, str. 195 - 316